

PATENT
Docket No. 12219/6

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

APPLICANTS: NISHIDA, Hiroyuki
SERIAL NO. : Unassigned
FILED : February 26, 2002
FOR : WAVEFRONT MEASURING APPARATUS AND WAVEFRONT
MEASURING METHOD

11017 U.S. PTO
10/083558
02/27/02

ASSISTANT COMMISSIONER
FOR PATENTS
Washington, D.C. 20231


CLAIM TO CONVENTION PRIORITY UNDER 35 U.S.C. § 119

SIR:

The Convention Priority Date of Japanese Patent Application No. 2001-051408 filed in Japan on February 27, 2001, was claimed in the Declaration/Power of Attorney filed on herewith. To complete the claim to the Convention Priority Date of said Japanese Patent Applications, a certified copy thereof is submitted herewith.

Respectfully submitted,

Dated: February 25, 2002


John C. Altmiller
(Reg. No. 25,951)

KENYON & KENYON
1500 K Street, N.W., Suite 700
Washington, DC 20005-1257
Tel: (202) 220-4200
Fax: (202) 220-4201

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

#3
06/008022
J1017 U.S. PTO
10/083558
02/27/02

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出願年月日
Date of Application: 2001年 2月27日

出願番号
Application Number: 特願2001-051408

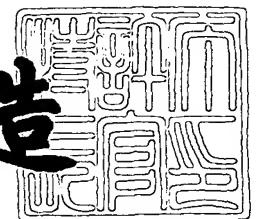
[ST.10/C]: [JP 2001-051408]

出願人
Applicant(s): オリンパス光学工業株式会社

2002年 1月18日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2001-3115886

【書類名】 特許願

【整理番号】 01P00180

【提出日】 平成13年 2月27日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 G01M 11/00

【発明者】

【住所又は居所】 東京都渋谷区幡ヶ谷 2 丁目 4 3 番 2 号 オリンパス光学
工業株式会社内

【氏名】 西田 浩幸

【特許出願人】

【識別番号】 000000376

【氏名又は名称】 オリンパス光学工業株式会社

【代表者】 岸本 正壽

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 002314

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 波面測定装置および波面測定方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 被検光学系の波面を測定する波面測定装置であって、
該波面測定装置は光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有し、
該被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材が前記被検光学系側に平面を向けて配置され、
前記被検光学系と前記平凸形状の光学部材の間を液体で満して測定を行うことを特徴とする波面測定装置。

【請求項 2】 被検光学系の波面を測定する波面測定装置であって、
該波面測定装置は光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有し、
該被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材が前記被検光学系側に平面を向けて配置され、
前記被検光路と前記参照光路との光路長が略等しく、
前記光源のコヒーレンス長を L 、前記平凸形状の光学部材の肉厚を d 、屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件 (2) を満足することを特徴とする波面測定装置。

$$L < 2 \times n_{opt} \times d \quad (2)$$

【請求項 3】 光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有する測定光学系を用いて、被検光学系の波面を測定する波面測定方法であって、
肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材を、前記被検光学系側に平面を向けて前記被検光路中に配置し、
前記被検光学系と前記平凸形状の光学部材の間を液体で満して測定を行うことを特徴とする波面測定方法。

【請求項 4】 光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有する測定光学系を用いて、被検光学系の波面を測定する波面測定方法であって、

肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材を、前記被検光学系側に平面を向けて前記被検光路中に配置し、

前記被検光路と前記参照光路との光路長を略等しくし、

前記光源のコヒーレンス長を L 、前記平凸形状の光学部材の肉厚を d 、屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件 (2) を満足するようにして測定を行うことを特徴とする波面測定方法。

$$L < 2 \times n_{opt} \times d \quad (2)$$

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、レンズやプリズム、その他の光学素子を有する光学系（以下、被検光学系という）の光学性能を評価する波面測定装置および測定方法に関する。特に、被検光学系が液浸光学系であった場合においても、不要な反射光の影響や収差の影響を受けない波面測定装置および測定方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

被検光学系の性能評価を行うために用いられる従来の測定装置を図8に示す。測定装置はフィゾー干渉光学系を備えており、光源1、集光レンズ2、ピンホール3、ビームスプリッタ4、コリメートレンズ5、参照部材である半透過ミラー6、凹面部材8、スペーシャルフィルタ9、リレーレンズ10、撮像素子であるCCDカメラ11で構成されている。そして被検光学系として対物レンズ7が半透過ミラー6と凹面部材8との間に配置されている。

【0003】

光源1から射出した光は、集光レンズ2で一旦ピンホール3上に集光される。ピンホール3の開口部分を通じた光はコリメートレンズ5で平行光束になり、半透過ミラー6に入射する。半透過ミラー6では、所定の反射率（あるいは透過率）に応じて反射する光と透過する光が生じる。ここで、半透過ミラー6に入射した光のうち、半透過ミラー6で反射された光を参照光とする。参照光はコリメートレンズ5を通過し、ビームスプリッタ4で反射される。そして、スペーシャ

ルフィルタ9、リレーレンズ10を通過してCCDカメラ11に入射する。

【0004】

一方、半透過ミラー6を透過した光は、対物レンズ7に入射する。ここで、被検光学系（対物レンズ7）を通過した光のことを被検光とする。対物レンズ7に収差があると、被検光の波面が変形する。対物レンズ7で集光された被検光は、その後発散して凹面部材8に入射する。凹面部材8の凹面は、入射した光の反射方向が入射方向と同じになるような曲率を有している。よって、凹面部材8の凹面で反射された被検光は再び対物レンズ7に入射し、平行光束となって対物レンズ7から射出する。対物レンズ7を射出した平行光束は、半透過ミラー6を透過し、参照光と同じようにCCDカメラ11に入射する。

ビームスプリッタ4で反射された光には、参照光と被検光が含まれている。よって、両者によって干渉が生じる。そして、リレーレンズ10によってCCDカメラ11上に干渉縞が形成されるので、この干渉の様子を観察することができる。なお、半透過ミラー6を光軸に沿って移動させることにより、測定に適した干渉縞を得ることができる。CCDカメラ11上に形成された干渉縞には、対物レンズ7の収差に関する情報が含まれている。よって、この干渉縞を解析することで対物レンズ7の波面収差等を求めることができる。

なお、図8の構成では、参照光が通過する光路、すなわち半透過ミラー6からビームスプリッタ4まで（あるいはCCDカメラ11まで）が参照光路に該当する。また、被検光が通過する光路、すなわち凹面部材8からビームスプリッタ4まで（あるいはCCDカメラ11まで）が被検光路に該当する。また、光源1からビームスプリッタ4までは共通光路である。同様に、ビームスプリッタ4からCCDカメラ11までも共通光路といえる。

【0005】

図8と同様に、干渉光学系を利用して被検光学系の光学特性を測定する類似技術として、特開平10-90113号公報に開示されている技術がある。特開平10-90113号公報では、凹面部材8の代わりに半球状レンズを用いている。半球状レンズを用いた理由は、半球状レンズの硝材が持つ屈折率によって、光束の広がり角を小さくできるからである。そして、これにより、被検レンズから

射出した光を反射させて再び被検レンズに戻すための光学部材（図8の凹面鏡8や特開平10-90113号公報の半球レンズ）を、小さくそして軽く作製することができるという特徴を備える。また、半球レンズの厚みにカバーガラス厚も考慮することで、補正板が不要になるという効果を得ている。

【0006】

また、特開平9-184787号公報に開示されている技術は、被検レンズに液浸対物レンズを用いた場合でも測定が可能となるようにする技術である。特開平9-184787号公報では、被検レンズを3組用意し、そのうちの2組を対向させて波面測定を行う。そして、これを3通りの組合せで行い、演算によって波面を求めている。この時、3通りの測定において座標系が狂っていると正確な演算が行えないので、座標系の位置関係が保持されるようにしている。なお、被検レンズが液浸対物レンズの場合、対向させた被検レンズの間を液体で満たすことが開示されている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

特開平10-90113号公報では、半球状レンズを使用した場合には確かに素子自体を小さく作製することは可能である。しかしながら、半球状レンズの平面部での反射光の影響が避けられないという問題を有している。例えば、特開平10-90113号公報の図1に示されているように、被検レンズのうち先端部のレンズと半球状レンズとの間は空気である。そのため、被検レンズから射出して半球状レンズに入射する光のうち、半球状レンズの平面部で約4%程度の反射が生じる。一方、半球状レンズの凸面の反射率も約4%である。

よって、半球状レンズの凸面で反射した被検光に加えて、本来は必要のない半球状レンズの平面で反射した光が加わることになる。平面プレートの反射率を約4%に設定しておく、参照光と被検光の光強度がほぼ同じになる、そのため、干渉によって形成される干渉縞は、本来得られる干渉縞と同程度でかなり高いコントラストを有する。ところが、半球状レンズの平面部で反射光が生じると、この反射光も被検光と一緒に参照光と干渉する。この時、この反射光の光強度は被検光とほぼ同じである。よって、この反射光による干渉縞のコントラストは

、参照光と被検光によって生じる干渉縞のコントラストとほぼ同じになる。

【 0 0 0 8 】

このように、特開平 1 0 - 9 0 1 1 3 号公報の構成では、参照光と被検光によって生じる干渉縞だけでなく、参照光と半球状レンズの平面部で反射した光によって生じた干渉縞が、CCDカメラ上に形成される。ところが、これら2つの干渉縞はコヒーレントな足し算（振幅の足し算）として得られるため、干渉縞を撮像した後で分離することはできない。すなわち、本来必要とする参照光と被検光によって生じた干渉縞から、参照光と半球状レンズの平面で反射した光によって生じた干渉縞を除去することができない。この結果、正しい波面測定が行えないという問題が生じる。

【 0 0 0 9 】

平面部で生じる反射光を低減する目的で、平面部に反射防止コート等をつけることも考えられる。しかしながら、被検光学系の開口数が高い場合、平面に入射する光の角度は最大で約 70° 程度になる。通常、 0° から 70° の幅広い入射角に対し反射率をゼロ近くとするような反射防止コートをつけることは、實際上非常に困難である。また、被検レンズと半球状レンズとの間が空気であるために、半球状レンズが完全な半球（カバーガラスの補正分を除いて）からずれた場合、これが収差となって現れてしまうために十分な測定ができないという問題もある。

【 0 0 1 0 】

一方、特開平 9 - 1 8 4 7 8 7 号公報 に示された技術は、被検光学系に乾燥系だけでなく液浸系も考慮された構成となっているが、被検光学系が少なくとも3セット必要となる。また、各組合せにおいて座標系を合わせなければならず、光学系の調整が非常にシビアで困難であるという問題を有している。

【 0 0 1 1 】

本発明は上記問題を鑑みてなされたものであり、凹面部材を使った従来の測定方法と同等の取扱い易さで、被検光学系の波面測定が行える波面測定装置及び波面測定方法を提供することを目的とする。また、被検光学系として、対象物と光学系の間が液体で満たされている液浸光学系においても良好な測定が行えること

を目的とする。また、被検光学系から射出する光を反射する光学部材において、被検光学系に最も近い面で反射が生じて、この反射の影響をほとんど受けない波面測定装置及び波面測定方法を提供することを目的とする。

【 0 0 1 2 】

【課題を解決するための手段】

上記問題を解決するために、本発明の波面測定装置は、被検光学系の波面を測定する波面測定装置であって、該波面測定装置は光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有し、該被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材が前記被検光学系側に平面を向けて配置され、前記被検光学系と前記平凸形状の光学部材の間を液体で満たして測定を行うことを特徴としている。

【 0 0 1 3 】

また、本発明の別の波面測定装置は、被検光学系の波面を測定する波面測定装置であって、該波面測定装置は光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有し、該被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材が前記被検光学系側に平面を向けて配置され、前記被検光路と前記参照光路との光路長が略等しく、前記光源のコヒーレンス長を L 、前記平凸形状の光学部材の肉厚を d 、屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件 (2) を満足することを特徴としている。

【 0 0 1 4 】

$$L < 2 \times n_{opt} \times d \quad (2)$$

また、本発明の波面測定方法は、光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有する測定光学系を用いて、被検光学系の波面を測定する波面測定方法であって、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材を、前記被検光学系側に平面を向けて前記被検光路中に配置し、前記被検光学系と前記平凸形状の光学部材の間を液体で満たして測定を行うことを特徴としている。

【 0 0 1 5 】

また、本発明の別の波面測定方法は、光源と、参照光を生じる参照部材が配置

された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有する測定光学系を用いて、被検光学系の波面を測定する波面測定方法であって、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材を、前記被検光学系側に平面を向けて前記被検光路中に配置し、前記被検光路と前記参照光路との光路長を略等しくし、前記光源のコヒーレンス長を L 、前記平凸形状の光学部材の肉厚を d 、屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件（２）を満足するようにして測定を行うことを特徴としている。

【 0 0 1 6 】

$$L < 2 \times n_{\text{opt}} \times d \quad (2)$$

【 0 0 1 7 】

【発明の実施の形態】

本発明の実施の形態の波面測定装置は被検光学系の波面を測定するもので、波面を測定するために干渉を利用している。本発明の実施の形態における第１の構成では、干渉を生じさせるために、光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、被検光学系が配置される被検光路とを有している。被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材が、前記被検光学系側に平面を向けて配置されている。そして、被検光学系と平凸形状の光学部材の間を液体で満して測定を行う。

【 0 0 1 8 】

第１の構成は、被検光学系と平凸形状の光学部材（以下、平凸部材という）の間を液体で満たすことにより、平凸部材の平面部を境にして被検光学系側と平凸部材の内部側との屈折率差を小さくするものである。この屈折率差は平凸部材の屈折率と液体の屈折率によって異なってくるが、第１の構成と被検光学系と平凸部材の間が空気の場合とを比べると、両者の平凸部材が同じ屈折率であるならば、第１の構成の方が平凸部材の平面部における光の反射を格段に小さくすることができる。

【 0 0 1 9 】

このように、第１の構成では平凸部材の平面部における反射光（以下、ノイズ光とする）の発生を小さく抑えることができる。ノイズ光の発生が小さければ、

ノイズ光と参照光によって生じる干渉縞もほとんど発生しなくなる。よって、第1の構成では、本来必要とする被検光と参照光による干渉縞のみを検出することができる。

【0020】

また、液体と平凸部材との屈折率差を小さくすることによって、平凸部材が完全な半球でなくてもここで発生する収差が格段に小さくなる。例えば、平凸部材の中心肉厚が完全な半球よりも大きいとする。この場合、被検光学系と平凸部材の間に、平行平板が存在していることと等価になる。ここで、液体と平凸部材との屈折率差が大きければ、平行平板に相当する部分で収差が生じる。しかしながら、液体と平凸部材との屈折率差が小さければ、平行平板に相当する部分は液体とみなすことができる。これは、平行平板が存在しないのと同じになる。よって、収差の発生が非常に少なくなる。なお、平凸部材の中心肉厚が、完全な半球よりも小さい場合も同様のことがいえる。

【0021】

このように、液体と平凸部材との屈折率差を小さくすることによって、平凸部材を完全な半球にする必要がなくなるので、平凸部材を製作する際の製作精度を緩くすることができる。そのため、平凸部材の製作性を良くすることができる。また、この第1の構成は、被検光学系を複数用意する必要がない点や、凹面部材を使った光学系の測定と同等の操作性で液浸光学系の波面測定ができる点で優れている。

【0022】

なお、この第1の構成で用いられる液体としては、例えば顕微鏡で用いられるようなイメージンオイルなどが考えられる。ただし、被検光学系が液浸光学系の場合、通常、被検光学系は所定の浸液を介して使用することを前提に設計されている。よって、第1の構成で用いられる液体は、被検光学系が使用することを前提としている浸液と同じもの、あるいは略同じ屈折率のものであるのが良い。

【0023】

次に、第1の構成において、液体の屈折率を n_{liq} 、平凸形状の光学部材の屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件(1)を満足することが好ましい。

$$|n_{\text{liq}} - n_{\text{opt}}| \leq 0.1 \quad (1)$$

条件(1)はノイズ光の発生を、より小さく抑えるための条件である。この条件(1)について説明する。高精度な(十分に収差が補正された)光学系の測定を行う場合には、装置で発生する誤差成分を極力抑えることが必要である。誤差成分には色々あるが、ここで問題としているのはノイズ光である。条件(1)はこのノイズ光の発生をより小さく抑えるための条件で、上限値の0.1を超えるとノイズ光の光強度が強くなる。そのため、本来必要とする干渉縞に加えて、このノイズ光による不要な干渉縞(ノイズ成分)が形成されてしまうので好ましくない。

【0024】

これに対して、条件(1)を満足するように液体と平凸部材を選ぶと、ノイズ光の光強度を十分に小さくすることができる。この結果、不要な干渉縞の発生を抑えることができ、本来必要とする干渉縞のみを得ることが可能になる。また、平凸部材が完全な半球でなかったとしても、これによる収差発生量を小さく抑えることができる。よって、特に高精度な光学系の測定を行う場合に有効である。

【0025】

本発明の実施の形態における第2の構成は、光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、被検光学系が配置される被検光路とを有している。また、被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材が、被検光学系側に平面を向けて配置されている。そして、被検光路と参照光路との光路長が略等しく設定されている。また、光源のコヒーレンス長をL、平凸形状の光学部材の肉厚をd、屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件(2)を満足する。

【0026】

$$L < 2 \times n_{\text{opt}} \times d \quad (2)$$

第2の構成は、ノイズ光が発生した場合でも、このノイズ光による干渉縞が形成されないようにするもので、条件(2)はそのための条件である。

【0027】

前述の第1の構成は、被検光学系と平凸部材との間を液体で満たすことにより、この平凸部材の平面部で生じる反射を抑えるものである。しかしながら、原理

的にこの反射を抑えることが非常に困難な場合がある。例えば、平凸部材がガラスで、被検光学系が水浸光学系の場合である。この場合、被検光学系と平凸部材の間を満たす液体は水になる。ところが、水の屈折率は油の屈折率に比べて低い
ため、液体と平凸部材の屈折率差を小さくできない。

【 0 0 2 8 】

具体的には、被検光学系が水浸光学系の場合、平凸部材の平面での反射は約 0.4 % 程度になる。平凸部材の凸面での反射が約 4 % であるので、1 割程度のノイズ光が存在することになる。約 0.4 % 程度のノイズ光によって生じる干渉縞が測定に影響するか否かは、必要とする測定精度によって異なるが、少なくとも高精度な測定を行う場合には無視できない。

【 0 0 2 9 】

ところで、干渉は参照光路と被検光路の光路差が光源のコヒーレンス長（可干渉距離）以下の場合に生じる現象である。第 2 の構成において参照光と干渉する可能性があるのは、主に被検光とノイズ光の 2 つである。被検光とノイズ光との違いは、被検光が平凸部材の平面部と凸部の間を往復して被検光学系に戻るのに対して、ノイズ光は平凸部材の平面部で反射されて被検光学系に戻る点である。すなわち、撮像素子に到達するまでの光路長を比べると、ノイズ光の光路長に比べて被検光の光路長の方が $2 \times n_{\text{opt}} \times d$ 長いということである。

【 0 0 3 0 】

そこで、第 2 の構成では、撮像素子に達するまでの距離が被検光と参照光がで略等しくなるように被検光路と参照光路を構成し、更に、 $2 \times n_{\text{opt}} \times d$ よりも小さいコヒーレンス長 L を有する光源を用いる。このようにすると、被検光と参照光の光路長はほぼ同じであるので、光路差がほとんどゼロである。すなわち、光路差が光源のコヒーレンス長よりも小さい。よって、被検光と参照光とで干渉縞が生じる。一方、ノイズ光と参照光の光路差は $2 \times n_{\text{opt}} \times d$ よりも大きい。すなわち、光路差が光源のコヒーレンス長 L を超えている。よって、ノイズ光と参照光とでは干渉縞が生じない。

【 0 0 3 1 】

この結果、第 2 の構成では、被検光と参照光によって形成された干渉成分（明

暗成分)と、ノイズ光によるバックグラウンド成分(均一な明るさ成分)の2つが重なった強度分布が撮像素子上に形成される。ただし、この強度分布は両成分はそれぞれの強度の和である。そのため、バックグラウンド成分は、後工程の画像処理で除去(引き算)することができる。よって、被検光と参照光によって形成された干渉縞のみを取り出すことができる。このように、第2の構成では、ノイズ光によるノイズ成分を除去することができるので、高精度な光学系の測定にも対応することができる。

【0032】

ただし、図8のようなフィゾー干渉光学系の場合は、参照光路と被検光路の間に元々光路差がある。よって、第2の構成にフィゾー干渉光学系を用いた場合には干渉縞が全く得られず、本来の測定自身ができない可能性がある。したがって、第2の構成を用いる干渉光学系としては、被検光路と参照光路との光路長が等しくできる干渉光学系、例えば、マイケルソン干渉光学系やマッハ・ツェンダー干渉光学系などが好ましい。

【0033】

なお、光源としてコヒーレンス長の長いレーザなどを用いると、条件(2)を満足するためには平凸部材の肉厚 d を大きくしなければならない。そうすると、平凸部材が大きくなるので、平凸部材の製作が難しくなる。また、測定装置の大型化を招く。よって、光源としては、コヒーレンス長の短い光源、例えばスーパーミネッセンスダイオードや、発光ダイオード、あるいは水銀ランプのような低コヒーレンス光源を使用するのが好ましい。

【0034】

また、上記第1の構成や第2の構成において、被検光学系と平凸形状の光学部材の間にある媒質の屈折率を n_{med} 、屈折率を n_{opt} 、曲率半径を r 、肉厚を d とした時、以下の条件(3)を満足するのが好ましい。

【0035】

$$|n_{\text{med}} - n_{\text{opt}}| \times |r - d| \leq 0.01 \text{ mm} \quad (3)$$

条件(3)は、平凸部材において生じる収差を小さくするための条件である。ここで、平凸部材において生じる収差とは、平凸部材の形状が完全な半球からは

ずれた場合によって生じる収差のことである。より詳しくは、平凸部材の肉厚が所定の肉厚と異なることによって生じる収差のことである。

【0036】

平凸部材において収差が生じると、被検光の波面が持つ収差は、被検光学系自体で生じた収差に平凸部材において生じた収差が加わったものになる。前述のように、被検光の波面の情報は、参照光との干渉によって干渉縞となって現れる。しかしながら、干渉縞が形成された状態では、被検光学系自体で生じた収差と平凸部材において生じた収差とを分離することはできない。そのため、被検光学系自体で生じた収差のみを、検出することができなくなる。

【0037】

条件（3）を満足すると、平凸部材において生じる収差を小さくすることができる。例えば、 $|r-d|$ が大きいと被検光学系と平凸部材の間に平行平板が存在する状態になる。しかしながら、 $|n_{\text{med}}-n_{\text{opt}}|$ が小さいため、条件（1）で説明したように平行平板が存在しないことと等価になる。よって、平凸部材で発生する収差を小さく抑えることができる。一方、 $|r-d|$ が小ければ、当然、平行平板が存在しなくなるので、平凸部材で発生する収差を小さく抑えることができる。なお、 $|r-d|$ が小さいと $|n_{\text{med}}-n_{\text{opt}}|$ を多少大きくできるが、 $|n_{\text{med}}-n_{\text{opt}}|$ 大きくなると平凸部材の平面部でのノイズ光が発生するので、あまり大きくしない方がよい。

【0038】

このように、条件（3）を満足すると、平凸部材の平面部での反射光の存在はやむを得ないとしても、平凸部材が完全な半球でないために発生する収差を少なくとも抑えることができる。なお、 $|n_{\text{med}}-n_{\text{opt}}|$ の値としては、可視領域の波長で、被検光学系が水浸光学系であった場合には、半球レンズの材質によって異なるが、0.2～0.5程度が考えられる。また、赤外領域の波長で、被検光学系が通常光学系であった場合、半球レンズの材質としてシリコンを用いたときには、4程度が考えられる。ここで、通常光学系とは、物体と被検光学系の間が空気で満たされているような光学系である。

【0039】

さらに、被検光路と参照光路に配置されている光学部材において、少なくとも平凸部材の凸面に反射コーティングが施されていることが望ましい。図 8 に示した構成においては、一般的に凹面部材 8 はガラス等の素材面の反射を用いているので、約 4 % の反射光で測定を行っている。しかしながら、このような測定は、光源から射出された光の利用効率の点からみると非常に効率が悪い。効率を上げるために凹面部材 8 の凹面に反射コーティングを施すことも考えられるが、先に説明したようにこれはコーティング面の面精度等が確保できないために困難である。そこで、本発明のように反射コーティングを施す部材が平凸部材であれば、反射面の精度は素材の凸面の面精度で決まるため、極端に言うと反射コーティングはただ単に凸面の表面につけばよいということになる。したがって、コーティングに関して技術的な困難を伴わずに、光源からの光を有効に活用することが可能となる。また、平凸レンズの平面でノイズ光が発生したとしても、凸面に反射コーティングを施すことで被検光の光量を大きくできる。よって、S N 比の良い測定が可能となる。

【 0 0 4 0 】

なお、参照光を発生させる参照部材の方にも、反射コーティングを施すのが好ましい。このように、参照光と被検光の強度の絶対値を大きくし、しかも両者の強度を同程度にすれば、ノイズ光によって形成される干渉縞のコントラストに比べて、被検光によって形成される干渉縞のコントラストを相対的に高くできる。よって、さらに S N 比の良い測定が可能となる。

【 0 0 4 1 】

以下本発明の実施例について、図を参照しながら詳細に説明する。

(第 1 実施例)

本発明の波面測定装置の第 1 実施例について説明する。図 1 は第 1 実施例の波面測定装置の構成を示す図である。波面測定装置 1 0 0 は図 8 と同じく、フィゾー干渉光学系をベースとしている。よって、図 8 と同じ構成要素には同じ番号を付し、説明は省略する。本実施例の波面測定装置 1 0 0 は、図 8 で用いられていた凹面部材 8 の代わりに、平凸レンズ（平凸部材）1 3 を用いている。また、被検光学系 1 2 は液浸光学系であるため、被検光学系 1 2 と平凸レンズ 1 3 との間

を浸液 1 4 で満たしている。

【 0 0 4 2 】

光源 1 から射出して被検光学系 1 2 を通過した被検光は、平凸レンズ 1 3 の凸面で反射される。そして、再び被検光学系 1 2 を通過し、ビームスプリッタ 4 で反射されて CCD カメラ 1 1 に達する。一方、光源 1 から射出した光の一部は半透過ミラー（参照部材） 6 で反射され、被検光と同様に CCD カメラ 1 1 に達する。被検光と参照光の干渉により、CCD カメラ 1 1 上に干渉縞が形成される。この干渉縞を画像解析装置に取り込んで各解析を行えば、被検光学系の波面の測定、すなわち被検光学系で生じる各種収差を測定することができる。このように、本実施例の波面測定装置は、従来の波面測定装置と同じような操作で、液浸光学系の波面測定が行える。

【 0 0 4 3 】

また、本実施例の光源 1 は He - Ne レーザで、浸液 1 4 はオイルである。そして、浸液 1 4 の屈折率 $n_{liq} (n_{med})$ は波長 633 nm において 1.513 である。一方、平凸レンズ 1 3 の硝材の屈折率 n_{opt} は、波長 633 nm において 1.51462 である。よって、波長 633 nm における両者の屈折率差 $|n_{liq} (n_{med}) - n_{opt}|$ は 0.00162 となり、本発明の条件 (1) を満足している。このように、本実施例の波面測定装置は条件 (1) を満足しているので、平凸レンズ 1 3 の平面部 1 3 a で反射する光はほとんどゼロである。また、 $|n_{liq} (n_{med}) - n_{opt}|$ の値が小さいので、平凸レンズ 1 3 の肉厚の公差（製造誤差）は、それほど厳しい値は要求されない。

【 0 0 4 4 】

また、本実施例で使用している平凸レンズ 1 3 は、凸面の曲率半径 r は 12.504 ± 0.002 mm で、肉厚 d は 12.5 mm であるから、差の絶対値 $|r - d|$ は、最大で 0.006 mm となる。よって、条件 (3) を満足する。なお、平凸レンズ 1 3 としては、曲率半径 r と肉厚 d の差の絶対値 $|r - d|$ が、0.03 mm 以内で作製されたものを使用するのが好ましい。

【 0 0 4 5 】

ただし、この $|r - d|$ の値は、被検光学系 1 2 の光学性能に依存することは

言うまでもない。例えば、被検光学系 7 が高精度・高性能の光学系であった場合は、測定に要求される精度も厳しくなる。よって、このような場合にはこの $|r - d|$ の値も小さくする必要がある。

【0046】

また、被検光学系 1 2 が水浸対物レンズのように、浸液として水を使用する光学系の場合は、平凸レンズに用いる材質を商品名 Cyttop（旭硝子社製）のような樹脂にすれば、同様の測定を行うことができる。これは、波長 633 nm において、水である浸液 1 4 の屈折率が 1.331 で、Cyttop の屈折率が 1.34 で、 $|n_{\text{liq}}(n_{\text{med}}) - n_{\text{opt}}| = 0.009$ となり、条件 (1) を満足するからである。

【0047】

(第 2 実施例)

本発明の波面測定装置の第 2 実施例について説明する。図 2 は、第 2 実施例の波面測定装置の構成を示す図である。第 2 実施例では、波面測定装置 200 はマイケルソン干渉光学系をベースとしている。マイケルソン干渉光学系の場合、光源 1 からのレーザ光は、ビームスプリッタ 4 をそのまま直進する透過光と、透過光と異なる方向（実施例 2 では直交方向）方向に進む反射光とに分離される。

【0048】

本実施例では、透過光側に半透過ミラー 6 が配置されており、半透過ミラー 6 で参照光を発生させている。よって、ビームスプリッタ 4 と半透過ミラー 6 の間が参照光路になる。一方、反射光側には対物レンズ 1 2 と平凸レンズ 1 3 が配置され、その間は浸液 1 4 で満たされている。よって、ビームスプリッタ 4 と平凸レンズ 1 3 の間が被検光路になる。

【0049】

また、第 1 実施例と異なり、本実施例ではコリメートレンズ 5 がビームスプリッタ 4 よりも光源側に配置されている。そのため、ビームスプリッタ 4 を透過、あるいは反射した光は平行である。また、ビームスプリッタ 4 とスペーシャルフィルタ 9 の間には、第 1 のリレーレンズ 10 a が配置されている。そして、スペーシャルフィルタ 9 を通過した光（干渉光）を第 2 のリレーレンズ 10 b で集光

し、干渉縞をCCDカメラ11上に形成している。このように、最終的にCCDカメラ11で得られる干渉縞は、第1実施例と同じものである。よって、第1実施例と同様の測定が行える。また、干渉光学系はマイケルソン干渉光学系やフィゾー干渉光学系に限られるものでなく、他の干渉光学系を用いることも可能である。

【0050】

(第3実施例)

本発明の波面測定装置の第3実施例について説明する。図3は、第3実施例の波面測定装置の構成を示す図である。第3実施例は第2実施例と同じく、波面測定装置300はマイケルソン干渉光学系をベースとしている。

【0051】

本実施例では、光源15に低コヒーレンス光源を使用している。低コヒーレンス光源としては、第1実施例や第2実施例で使用したレーザ光源1に比べて非常にコヒーレンス長が短いレーザ、水銀ランプ、スーパーluminescentダイオード等がある。本実施例では、低コヒーレンス光源を使用しているため、測定を行う際にはビームスプリッタ4と平凸レンズ13の凸面までの光路長と、ビームスプリッタ4から半透過ミラー6までの光路長が等しくなるようにしている。この光路長の調整は、1)半透過ミラー6を光軸に沿って移動させる、2)対物レンズ16と平凸レンズ13を一緒に光軸に沿って移動させる、という2つの方法があるが、半透過ミラー6を移動させる方が容易である。

【0052】

なお、上記構成において、平凸レンズ13は、平面部13aと凸面13bとの間の往復光路長($2 \times n \times d$)が、光源15のコヒーレンス長よりも長くなるように作製されている。すなわち、ビームスプリッタ4から平凸レンズ13の平面部13aまでの往復光路長とビームスプリッタ4から半透過ミラー6の反射面までの往復光路長と差が、光源15のコヒーレンス長よりも長い。そのため、これらの光どうしは干渉しない。ゆえに、平凸レンズ13の平面部13aでの反射光が存在したとしても、これは干渉縞に対してバックグラウンドとして一様に存在するものとなる。したがって、測定対象の干渉縞自体には影響を与えない。また

、このバックグラウンド成分は後処理で除去することができるので、適当な処理を行えば、その後の縞解析の精度を向上させることもできる。

なお、本実施例では、光源 1 5 のコヒーレンス長 L は $150\mu\text{m}$ で、平凸レンズの肉厚 d は 12.5mm 、屈折率 n_{opt} は 1.51825 であるから、条件 (2) を満足している。

【0053】

また、本実施例では、被検光学系 1 6 が水浸光学系であるため、被検光学系 1 6 と平凸レンズ 1 3 の間の浸液 1 7 は水である。ここで、水の e 線での屈折率 $n_{\text{liq}} (n_{\text{med}})$ が 1.334 で、平凸レンズ 1 3 の e 線での屈折率 n_{opt} が 1.51825 なので、 $|n_{\text{liq}} (n_{\text{med}}) - n_{\text{opt}}| = 0.18425$ となり、条件 (1) は満足していない。しかしながら、平凸レンズ 1 3 の曲率半径 r は $12.504 \pm 0.002\text{mm}$ であるから、最大で $|r - d| = 0.006\text{mm}$ となる。よって、条件 (3) を満足している。

【0054】

このように、本実施例では、平凸レンズ 1 3 の平面部 1 3 a による反射光が干渉縞に及ぼす影響はあまり排除できないが、平凸レンズで生じる収差の影響は排除できる。なお、平凸レンズ 1 3 としては、曲率半径 r と肉厚 d の差の絶対値 $|r - d|$ が、 0.03mm 以内で作製されたものを使用するのが好ましい。

【0055】

(第 4 実施例)

本発明の波面測定装置の第 4 実施例について説明する。図 4 は、第 4 実施例の波面測定装置の構成を示す図である。第 4 実施例は第 3 実施例と同じく、波面測定装置 4 0 0 はマイケルソン干渉光学系をベースとしている。本実施例では、被検光学系 1 8 が液浸光学系ではなく通常の光学系である点が異なる。ここで、通常の光学系とは被検光学系と標本の間が空気で満たされている光学系のことで、乾燥系光学系ともいう。

【0056】

このような通常の光学系であっても、光源 1 5 としてコヒーレンス長の短いものを用いれば、第 3 実施例で説明した通り、平凸レンズ 1 3 の平面部 1 3 a での

反射光は干渉に寄与しない。すなわち、CCDカメラ11上に形成される干渉縞には被検光学系のみの波面の情報が含まれるので、通常の光学系の測定においても精度良く波面測定が行える。

【0057】

なお、本実施例では、被検光学系18と平凸レンズ13との間が空気で満たされているので、屈折率 n_{opt} は1.51825、屈折率 n_{med} は1である。よって、 $|n_{\text{liq}}(n_{\text{med}}) - n_{\text{opt}}| = 0.51825$ となる。一方、平凸レンズの肉厚 d は12.5mm、曲率半径 r は $12.504 \pm 0.002\text{mm}$ であるから、最大で $|r - d| = 0.006\text{mm}$ となる。よって条件(3)を満足している。

【0058】

このように、本実施例でも、平凸レンズ13の平面部13aによる反射光が干渉縞に及ぼす影響をあまり排除できないが、平凸レンズで生じる収差の影響は排除できる。なお、平凸レンズ13としては、曲率半径 r と肉厚 d の差の絶対値 $|r - d|$ が、0.01mm以内で作製されたものを使用するのが好ましい。

【0059】

(第5実施例)

本発明の波面測定装置の第5実施例について説明する。図5は、第5実施例の波面測定装置の構成を示す図である。第5実施例の波面測定装置500は、マッハツェンダ干渉光学系を変形した光学系をベースとしている。光源1から出た光は、ビームスプリッタ4で透過光と反射光に分けられる。本実施例では、ビームスプリッタ4で反射されミラー20aに至る光路が参照光路である。参照光路にはミラー20aと20bが配置されており、参照光をビームコンバイナ19に導く。一方、ビームスプリッタ4を透過した光は、ビームコンバイナ19を通過して、被検光学系12に入射する。よって、こちらが被検光路となる。

【0060】

本実施例において、光源1はコヒーレンス長の長いレーザで、被検光学系12は液浸光学系であるが、光源としてコヒーレンス長の短い光源15を用いることもできる。コヒーレンス長の短い光源15を用いた場合には、参照光路と被検光路の光路長調整を行う必要がある。本実施例では矢印で示すように、被検光学系

12、浸液14、平凸レンズ13を一体にして光軸方向に移動することで、光路長調整を行っている。

【0061】

(第6実施例)

本発明の波面測定装置の第6実施例について説明する。図6は、第6実施例の波面測定装置の構成を示す図である。第6実施例の波面測定装置600は、干渉光学系部（参照光路と被検光路）をプリズムで構成している点が特徴である。このように、干渉光学系部をプリズム21で一体化することで、空気のゆらぎといった外乱の影響を受けにくくすることができる。

【0062】

(第7実施例)

本発明の波面測定装置の第7実施例について説明する。図7は、第7実施例の波面測定装置の構成を示す図である。第7実施例の波面測定装置700は、基本構成は第1実施例と同じである。ただし、被検光学系16が水浸光学系であり、平凸レンズ22の凸面22bにアルミが蒸着されている点が異なる。

光源1から出た光は、半透過ミラー6で反射する参照光と、半透過ミラー6を透過し被検光学系12を通過する被検光とになる。被検光は平凸レンズ22に入射して、凸部22bに達する。凸部22bには反射コーティング（アルミ蒸着）が施されている。本実施例では、反射コーティングによって凸面22bの反射率が約90%となっている。一方、半透過ミラー6にも反射率が約35%になる反射コーティングが施されている。これらの反射コーティングが無くても液浸光学系等では測定を行うことは可能であるが、測定精度を上げるためには反射コーティングを施すのが好ましい。

【0063】

また、平凸レンズの凸面に反射コーティングを施す構成は、以下の点で有利である。従来の構成において、凹面部材8の凹面に反射コーティングを施した場合を考える。この場合、被検光は反射コーティングの空気接触面側で反射する。よって、空気接触面側のコーティング精度（コーティング形状の正確さやなめらかさ）を高精度に確保する必要がある。このため、高度なコーティング技術が必要

になる。これに対して、本実施例のように平凸レンズの凸面反射コーティングを施した場合を考える。この場合、被検光は平凸レンズ 2 2 の凸部 2 2 b と反射コーティングの境界部で反射する。ところが、この境界部の面精度（面形状の正確さや面の粗さ）は平凸レンズの凸部の加工精度で決まる。すなわち、反射コーティングの空気接触面側の面精度には依存しない。したがって、本実施例の場合、反射コーティングは、極端なことをいえばコーティングの厚みにムラがあっても良く、とにかく凸部についていれば良いということである。したがって、高度なコーティング技術を必要としないので、簡単に被検光の光量を増加させることができる。

【 0 0 6 4 】

なお、第 1 乃至第 6 実施例において、平凸レンズ 1 3 の凸面 1 3 b に反射コーティングを施しても良いことは明らかである。この場合は、半透過ミラー 6 にも平凸レンズ 1 3 の凸面 1 3 b と同じく反射コーティングすればよい。また、コーティングに使用するのはアルミ以外の金属であっても良いし、誘電体多層膜であっても良いことは言うまでもない。

【 0 0 6 5 】

なお、本発明には以下のような構成や方法も含まれる。

〔 1 〕 被検光学系の波面を測定する波面測定装置であって、

該波面測定装置は光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有し、

該被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材が前記被検光学系側に平面を向けて配置され、

前記被検光学系と前記平凸形状の光学部材の間を液体で満して測定を行うことを特徴とする波面測定装置。

〔 2 〕 前記液体の屈折率を n_{liq} 、前記平凸形状の光学部材の屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件（ 1 ）を満足することを特徴とする〔 1 〕に記載の波面測定装置。

$$| n_{liq} - n_{opt} | \leq 0.1 \quad (1)$$

〔 3 〕 被検光学系の波面を測定する波面測定装置であって、

該波面測定装置は光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有し、

該被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材が前記被検光学系側に平面を向けて配置され、

前記被検光路と前記参照光路との光路長が略等しく、

前記光源のコヒーレンス長を L 、前記平凸形状の光学部材の肉厚を d 、屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件 (2) を満足することを特徴とする波面測定装置。

$$L < 2 \times n_{opt} \times d \quad (2)$$

[4] 前記被検光学系と前記平凸形状の光学部材の間にある媒質の屈折率を n_{med} 、前記平凸形状の光学部材の屈折率を n_{opt} 、曲率半径を r 、肉厚を d とした時、以下の条件 (3) を満足することを特徴とする [1] 乃至 [3] に記載の波面測定装置。

$$|n_{med} - n_{opt}| \times |r - d| \leq 0.01 \text{ mm} \quad (3)$$

[5] 少なくとも前記平凸形状の光学部材の凸面に反射コートが施されていることを特徴とする [1] 乃至 [4] に記載の波面測定装置。

[6] 光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有する測定光学系を用いて、被検光学系の波面を測定する波面測定方法であって、

肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材を、前記被検光学系側に平面を向けて前記被検光路中に配置し、

前記被検光学系と前記平凸形状の光学部材の間を液体で満して測定を行うことを特徴とする波面測定方法。

[7] 前記液体の屈折率を n_{liq} 、前記平凸形状の光学部材の屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件 (1) を満足することを特徴とする請求項 6 に記載の波面測定方法。

$$|n_{liq} - n_{opt}| \leq 0.1 \quad (1)$$

[8] 光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有する測定光学系を用いて、被検光学系の波面を測定する波面測定方法であって、

肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材を、前記被検光学系側に平面を向けて前記被検光路中に配置し、
 前記被検光路と前記参照光路との光路長を略等しくし、
 前記光源のコヒーレンス長を L 、前記平凸形状の光学部材の肉厚を d 、屈折率を n_{opt} とした時、以下の条件 (2) を満足するようにして測定を行うことを特徴とする波面測定方法。

$$L < 2 \times n_{\text{opt}} \times d \quad (2)$$

[9] 前記被検光学系と前記平凸形状の光学部材の間にある媒質の屈折率を n_{med} 、前記平凸形状の光学部材の屈折率を n_{opt} 、曲率半径を r 、肉厚を d とした時、以下の条件 (3) を満足することを特徴とする [6] 乃至 [8] に記載の波面測定方法。

$$|n_{\text{med}} - n_{\text{opt}}| \times |r - d| \leq 0.01 \text{ mm} \quad (3)$$

[10] 少なくとも前記平凸形状の光学部材の凸面に反射コートが施されていることを特徴とする [6] 乃至 [10] に記載の波面測定方法。

【0066】

【発明の効果】

以上述べたように、本発明の波面測定装置は、従来の凹面部材を使った波面測定装置と同等の扱いやすさで、液浸の被検光学系の波面測定が行える。

【0067】

また、被検光を反射する平凸部材の平面部において、ノイズ光が発生することを抑えることができる。また、平凸部材の形状誤差に基づく収差の発生を、小さく抑えることができる。よって、被検光学系のみの収差による波面を、干渉縞として検出することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の波面測定装置の第1実施例を示す図である。

【図2】 本発明の波面測定装置の第2実施例を示す図である。

【図3】 本発明の波面測定装置の第3実施例を示す図である。

【図4】 本発明の波面測定装置の第4実施例を示す図である。

【図 5】 本発明の波面測定装置の第 5 実施例を示す図である。

【図 6】 本発明の波面測定装置の第 6 実施例を示す図である。

【図 7】 本発明の波面測定装置の第 7 実施例を示す図である。

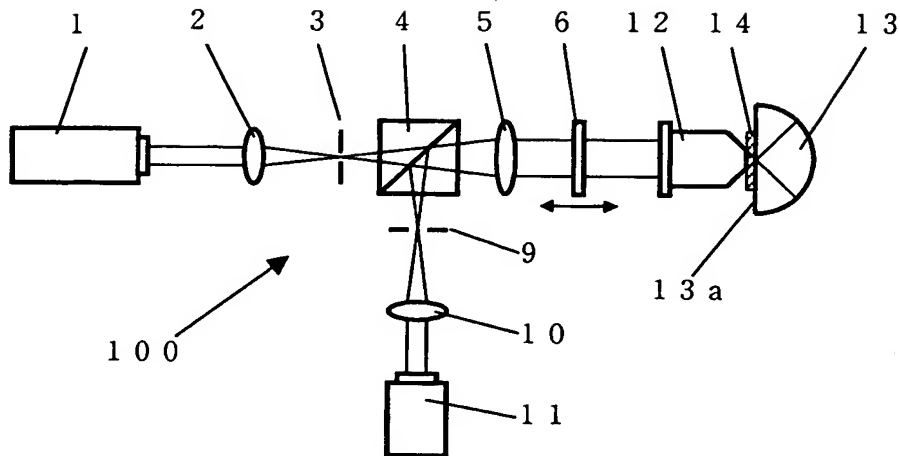
【図 8】 従来の波面測定装置を示す図である。

【符号の説明】

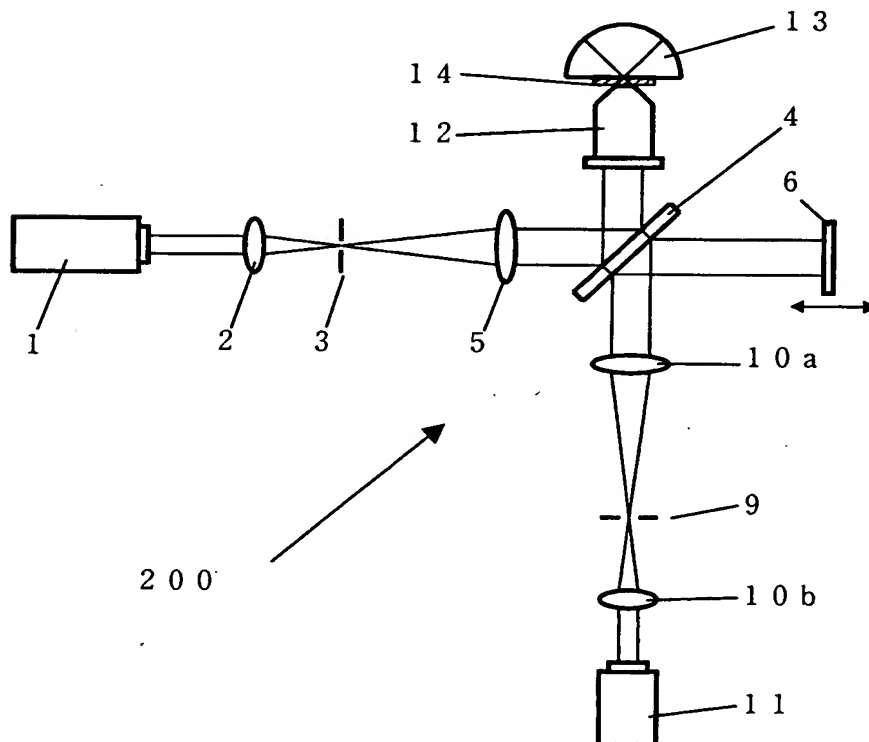
- 1、15 光源
- 2 集光レンズ
- 3 ピンホール
- 4 ビームスプリッタ
- 5 コリメートレンズ
- 6 半透過ミラー（参照部材）
- 7、12、16、18 被検光学系
- 8 凹面部材
- 9 スペーシャルフィルタ
- 10、10a、10b リレーレンズ
- 11 CCDカメラ
- 13、22 平凸レンズ（平凸部材）
- 14、17 浸液
- 19 ビームコンバイナー
- 20a、20b 反射ミラー
- 21 プリズム
- 100、200、300、400、500、600、700 波面測定装置

【書類名】 図面

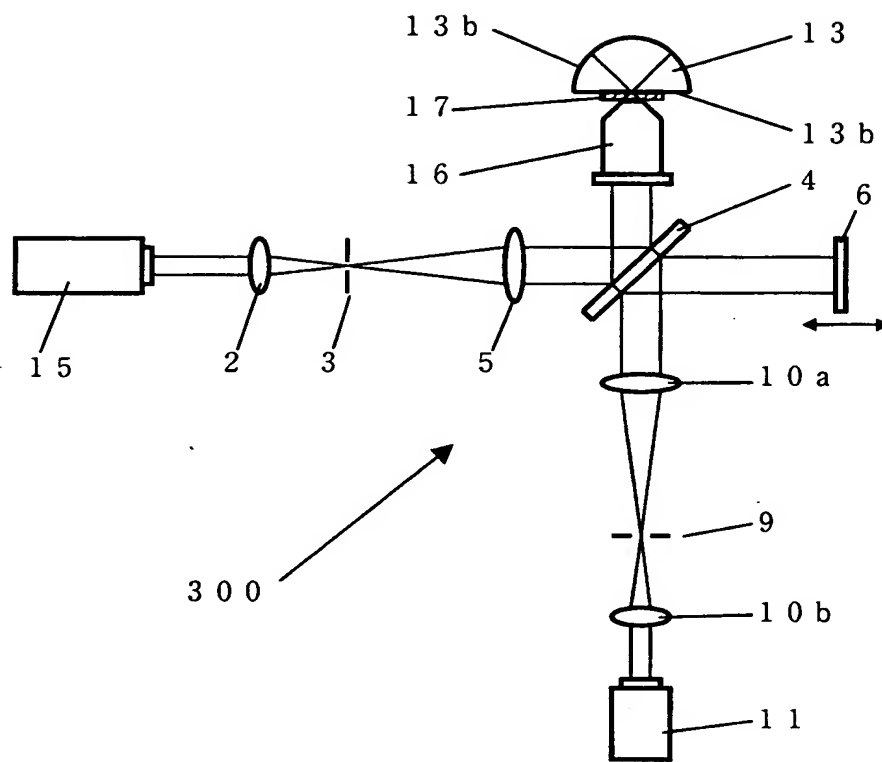
【図 1】



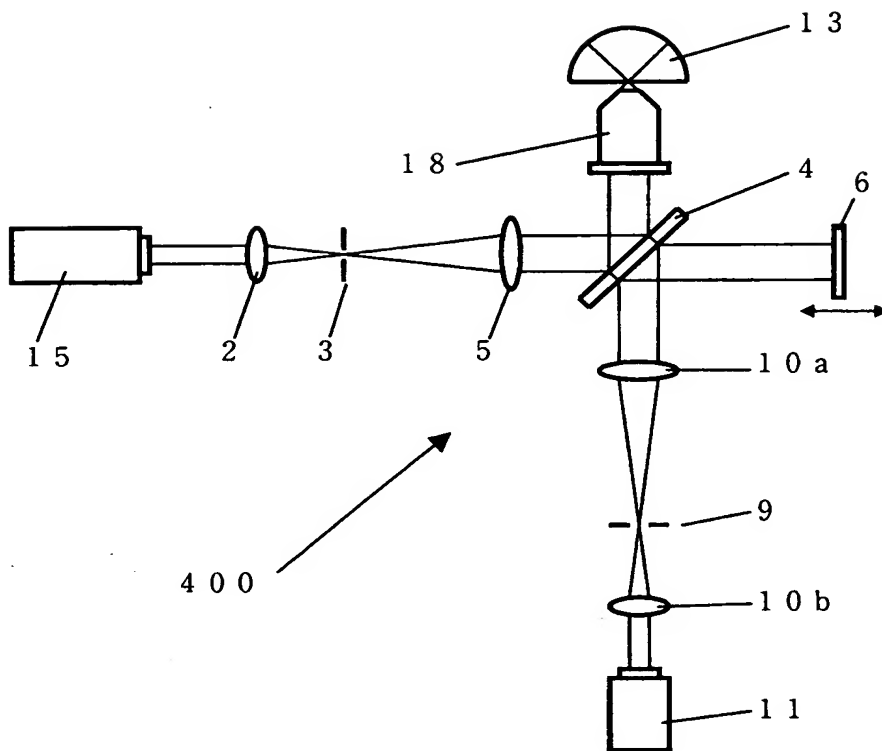
【図 2】



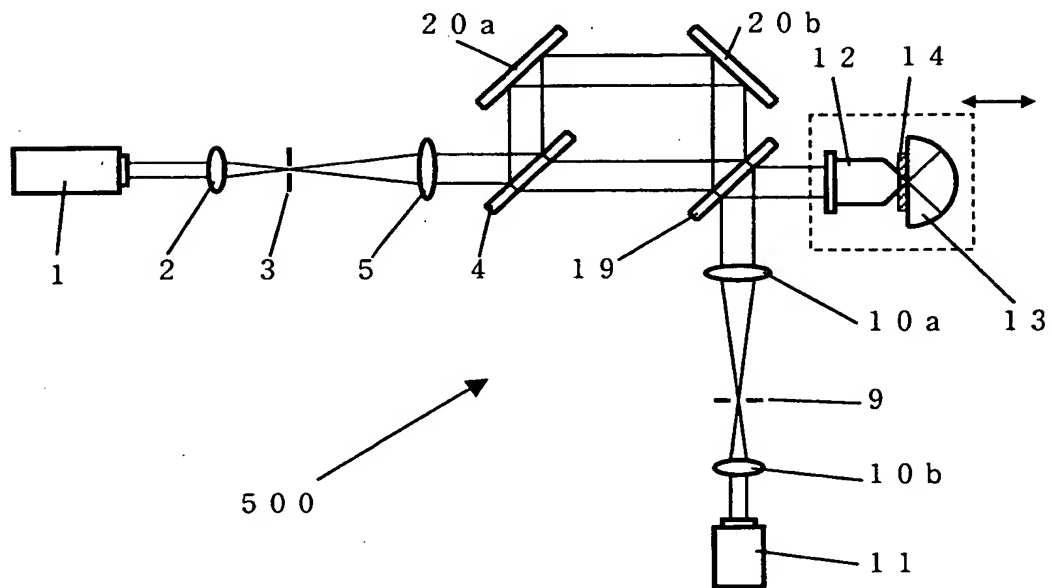
【図 3】



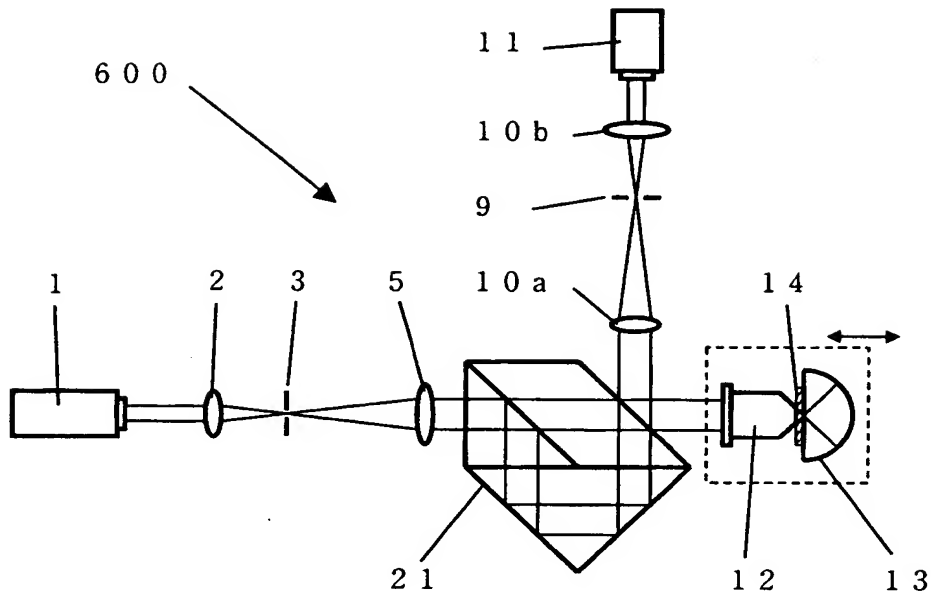
【図4】



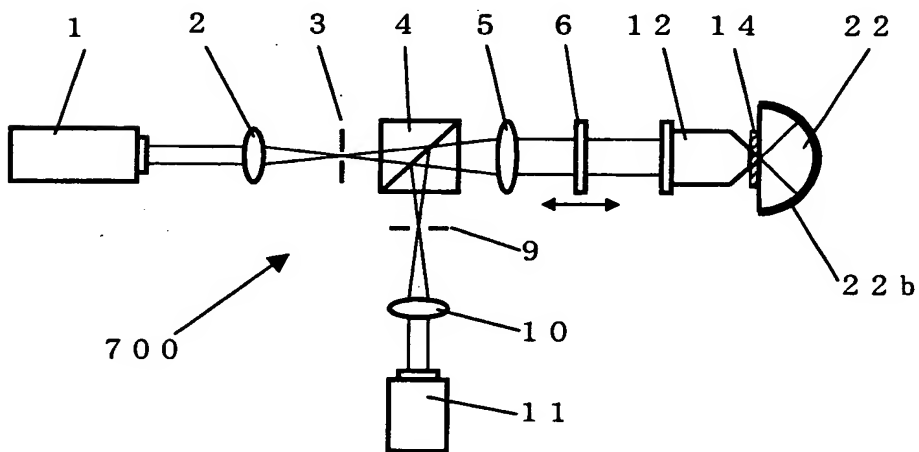
【図5】



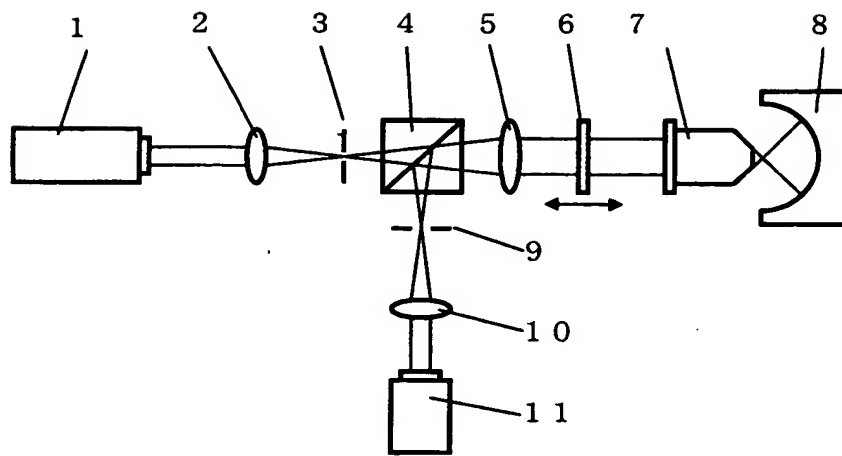
【図 6】



【図 7】



【図 8】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 凹面部材を使った従来の測定方法と同等の取扱い易さで、液浸光学系を含む被検光学系の光学的測定が行える測定装置及び測定方法を提供することを目的とする。また、被検光学系から射出する光を反射する光学部材において、被検光学系に最も近い面で反射が生じて、この反射の影響をほとんど受けない波面測定装置及び波面測定方法を提供することを目的とする。

【解決手段】 光源と、参照光を生じる参照部材が配置された参照光路と、前記被検光学系が配置される被検光路とを有する波面測定装置において、被検光路には、肉厚と凸面の曲率半径が略等しい平凸形状の光学部材を被検光学系側に平面を向けて配置し、被検光学系と平凸形状の光学部材の間を液体で満して測定を行う。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000000376]

1. 変更年月日 1990年 8月20日
[変更理由] 新規登録
住 所 東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号
氏 名 オリンパス光学工業株式会社